

Optimiser la Performance de calcul pour la cartographie en temps réel avec un Laser Scanner aéroporté

J. Skaloud, P. Schaer, B. Merminod

Préambule:

Cet article est essentiellement la traduction de: Skaloud J. & Schaer P.: *Optimizing Computational Performance for Real-Time Mapping with Airborne Laser Scanning*, présenté lors de: *Technical Commission I Symposium, WG II/5 Commission I, Calgary, June 2010* et publié dans: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 38, num. 1, 2010. Il s'inscrit dans la continuité de contributions publiées dans *Géomatique Suisse* 9/2008 et 3/2009.

Dans cet article, on évalue et on optimise les procédures de calcul pour la cartographie en temps réel à partir des mesures d'un laser scanner aéroporté. Les étapes considérées incluent le géoréférencement direct (GRD) du nuage de points, en temps réel et avec la résolution maximale, l'analyse de la couverture et de la densité des bandes scannées, la propagation d'erreur, la classification du sol, la production des modèles numériques de surface (MNS) et de terrain (MNT), ainsi que l'estimation de la qualité du MNT. Pour chaque étape de calcul, différentes approches sont implémentées dans le système «maison» Scan2map. Leur rapidité et leur exactitude sont évaluées en conditions réelles de lever. Les investigations montrent que le GRD est possible en temps réel avec un ordinateur portable usuel pour un rythme du scanner allant jusqu'à 200 kHz. De plus, on montre que l'analyse de la couverture et de la densité du nuage de points exige moins de puissance de calcul. Il en va de même pour le calcul du MNS et la génération des ombres dues au relief. Ainsi, ces tâches peuvent être effectuées rapidement après chaque ligne de vol. En fait, la classification nécessaire pour la production du MNT ainsi que la propagation d'erreur s'avèrent les plus gourmandes en calculs. Il faut donc maximiser leur vitesse d'exécution tout en maintenant leur exactitude. Les solutions retenues sont présentées, de même que des recommandations pour les développements ultérieurs.

Dieser Artikel befasst sich mit der Bewertung und Optimierung der Prozesse, die während luftgestützten Messflügen mittels Laser-Scanning-Systemen beteiligt sind. Die berücksichtigten Rechenschritte umfassen Echtzeit-Punktwolkeberechnung, Kontrolle der Punktdichte und der Abdeckung nach jeder Fluglinie, Fehlerfortpflanzungsberechnung, Bodenpunkte, Klassifizierung sowie Oberflächen- und Geländemodellgenerierung mit Qualitätsbeschreibung. Für jeden Rechenschritt wurden mehrere Vorgehensweisen in ein selbsterstelltes System implementiert. Dies ermöglicht die Beurteilung der Geschwindigkeit und der Gültigkeit der Berechnungen mittels echten Messflügen. Es wird nachgewiesen, dass Echtzeit-Prozessierungen von Punktwolken mittels konventionellen Laptops und mit einer Scanfrequenz von 200 kHz möglich sind. Zusätzlich zeigen wir, dass die Analysen der Punktdichte und der Abdeckung, sowie die Berechnung des Oberflächenmodells mit den dazugehörigen Schumierungen weniger rechenintensiv sind. Dies führt dazu, dass diese Schritte erst kurz nach dem Ende einer Fluglinie vollendet werden können. Demgegenüber wurde die Punktwolkeklassifizierung, die für die Berechnung des Geländemodells benötigt wird, zusammen mit der Fehlerfortpflanzungsberechnung als die meist rechenintensive Aufgaben identifiziert. Dementsprechend wurden diese Schritte so optimiert, dass die Genauigkeit erhalten wird. Die verbliebenen Lösungen, zusammen mit Empfehlungen für Weiterentwicklungen, werden in diesem Artikel vorgestellt.

1. Introduction

Le laser scanning aéroporté est une méthode très efficace et précise pour modéliser la surface de la Terre. Certaines applications posent des exigences élevées, par exemple une densité de plusieurs points par m² et une exactitude horizontale et verticale de 0.1 m. Contrairement au laser scanning terrestre, le laser scanning aéroporté conventionnel génère les coordonnées du nuage de points seulement après la mission. Les données du laser sont combinées avec la trajectoire de la plateforme dans un procédé nommé parfois «traitement de base». Les retours du laser sont séparés selon qu'ils concernent la végétation, les bâtiments ou le terrain au moyen d'une classification (semi-) automatique. Le modèle numérique de surface (MNS) et le modèle numérique de terrain (MNT) sont établis à partir du nuage de points agrégé, comme expliqué dans (El-Sheimy et al. 2005). Cette étape du calcul est nommée «traitement avancé». L'inconvénient majeur de la séparation du traitement en deux étapes est le délai entre l'acquisition des données et le contrôle de qualité, soit la vérification de leur complétude et de l'exactitude du modèle de terrain obtenu. Dans nos investigations précédentes, nous avons introduit des méthodologies pour le contrôle de qualité pendant le vol (Schaer et al. 2008) et, plus récemment, le cinématique en temps réel (RTK-ALS, Skaloud et al. 2010). Ce dernier article est une extension du précédent, où l'on s'efforce de réaliser pendant le vol les étapes du traitement «de base» et «avancé», de même que le contrôle de qualité du MNT (figure 1).

Pour faire face aux contraintes du calcul en temps réel, l'efficacité des algorithmes est cruciale. Dans cette contribution, on analyse la performance (le temps de calcul) des composantes critiques de l'outil de contrôle de qualité en vol présenté auparavant. L'article est structuré comme suit.

Quest'articolo si occupa della valutazione e dell'ottimizzazione dei processi che intervengono durante i voli di misurazione con i sistemi di laser scanning. Le fasi di calcolo considerate, includono il calcolo in tempo reale della nuvola di punti, il controllo della densità dei punti e l'estensione dopo ogni linea di volo, il calcolo della propagazione degli errori, la classificazione dei punti a terra nonché la generazione di modelli di superficie e terreno con descrizione della qualità. Per ogni fase di calcolo si sono applicati vari processi in un sistema autoconfezionato. Questo consente di giudicare la velocità e la validità dei calcoli tramite voli di misurazione reali. Siamo riusciti a dimostrare che l'elaborazione in tempo reale delle nuvole di punti è possibile con un laptop convenzionale e una frequenza di scanning di 200 kHz. Inoltre, comproviamo che le analisi della densità di punti e dell'estensione, come pure il calcolo del modello della superficie con le relative ombreggiature richiedono pochi calcoli. Questo fa sì che queste fasi possono essere completate solo dopo l'ultimazione di una linea di volo. In contrapposizione, si è identificata una classificazione della nuvola di punti, necessaria per il calcolo del modello del terreno, che assieme al calcolo della propagazione degli errori, costituisce uno degli elementi che richiedono più tempo di calcolo. Di conseguenza, queste fasi di calcolo sono state ottimizzate in modo tale da mantenere la precisione richiesta. Le soluzioni rimanenti, unitamente alle raccomandazioni per ulteriori sviluppi, sono oggetto di quest'articolo.

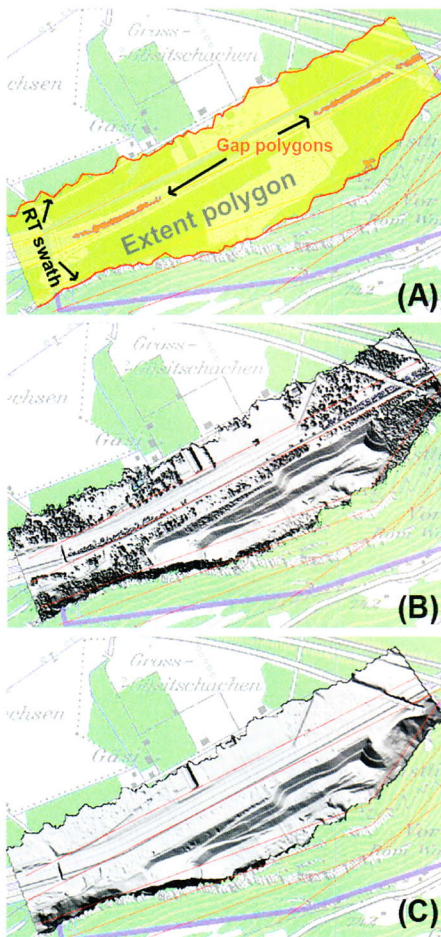


Fig. 1: Affichage de différents résultats du traitement en vol du nuage de points: (A) Limites de l'emprise, étendue des données et des lacunes, (B) ombrage du modèle de surface, (C) ombrage du modèle de terrain.

Après la liste des étapes du traitement dans la Section 2, nous comparons toutes les procédures de calcul en temps réel (Section 3) et en temps différé (Section 4) avec le même processeur. La vitesse des processeurs évolue rapidement, mais la comparaison relative est plus importante. Des développements futurs sont suggérés dans la conclusion.

2. Etapes du traitement

Les étapes du traitement peuvent être divisées en deux catégories, en fonction du délai de calcul (figure 2):

- Traitement en temps réel (on-line): Ceci inclut le GRD du nuage de points, c'est-à-dire sa génération obtenue en combinant les mesures du laser avec la trajectoire intégrée de la plateforme (Skaloud et al. 2010). Les coordonnées et toutes les informations requises pour le traitement ultérieur (p.ex. indicateurs

de précision pour la propagation d'erreur) sont sauvegardées dans un fichier. De plus, les limites de l'emprise au sol peuvent être affichées directement (figure 1A) pour informer l'opérateur quant à la progression du scan (Schaer et al. 2008).

- Traitement en temps différé ou par bande: Lorsque le nuage de points est disponible pour toute une ligne de vol, les données sont chargées et le contrôle de qualité (QC) est effectué. Ici nous faisons la distinction entre les opérations «de base» et «avancées» pour le QC. Les premières incluent le calcul de la densité du nuage de points, l'étendue des données, la détection des lacunes et le calcul du MNS. Les secondes englobent la classification du nuage de points (recherche des points du sol nu), la génération du MNT, la propagation d'erreur pour chaque point et la génération de diagrammes de qualité (Schaer et al. 2009). Les résultats de chaque étape du traitement peuvent être affichés dans un environnement de type SIG (figure 1). Une description détaillée des étapes ci-dessus se trouve dans (Schaer 2009).

Tous les tests de performance ont été réalisés avec un laptop DELL Latitude 820 (Intel(R) DualCore CPU T7600 @ 2.33 GHz, 2GB RAM) et des données du système Scan2map (Schaer et al. 2008).

3. Traitement on-line

Comme expliqué dans la section précédente, notre stratégie de calcul est différente pendant et après l'exécution d'une ligne de vol. Pendant le scan d'une zone d'intérêt, seules les tâches vitales sont

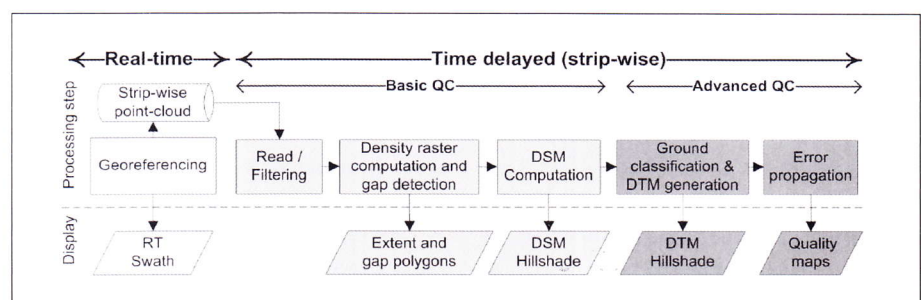


Fig. 2: Organigramme simplifié du traitement en vol du nuage de points.

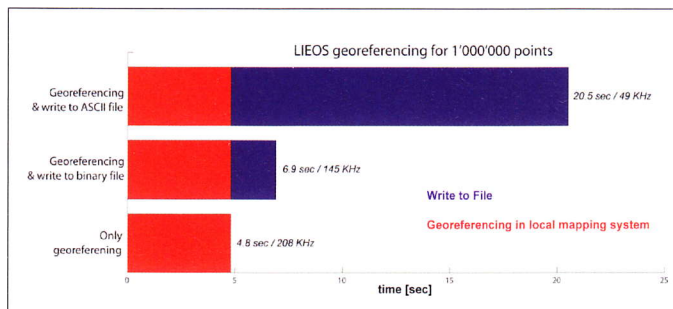


Fig. 3: Temps de calcul pour géoréférencer 10^6 mesures laser.

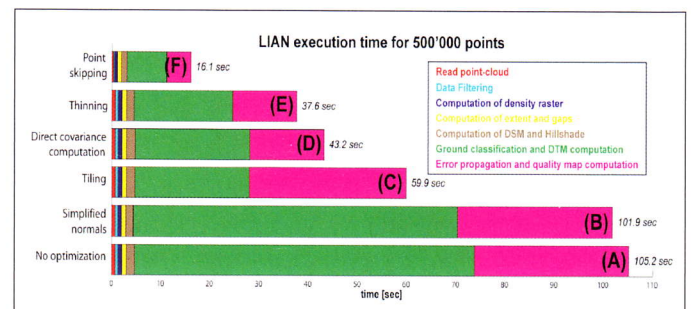


Fig. 4: Temps de calcul de LIAN pour un nuage de 500 000 points.

exécutées. Ce sont: le stockage des données, l'intégration de données GPS/INS en temps réel avec la fourniture d'information pour guider le pilote, le géoréférencement de tous les points du nuage et l'affichage de l'emprise effective.

3.1 Génération du nuage de points

Dans la chaîne de traitement en temps réel, c'est le GRD des données laser qui demande la plus grande puissance de calcul. Dans le cas de Scan2map, les données de la trajectoire sont cadencées à 400 Hz et les données laser à 10 kHz. La figure 3 illustre la performance du GRD avec le logiciel LIEOS (Lidar External Orientation) pour un million de points laser dans un cadre de référence local. La lecture des données binaires brutes et le GRD nécessitent environ 5 s, ce qui correspond à un rythme de env. 200 kHz. Pour les données de ce test, le temps de calcul ne dépend presque pas de la méthode de GRD implémentée dans LIEOS (grossière, approximative ou rigoureuse, voir Schaer et al. 2008). L'enregistrement simultané des données fait augmenter le temps de calcul. Si les données sont enregistrées dans un fichier ASCII, le temps de calcul excède 20 s (~50 kHz). Cependant, si les données sont stockées dans un format binaire optimisé, le ralentissement du processus est modéré, avec un rythme de env. 150 kHz. Cet exemple montre que la configuration actuelle de LIEOS est capable de réaliser le GRD en temps réel pour un rythme de scan situé entre 150 et 200 kHz, ce qui correspond à la limite du matériel actuel, ainsi qu'à la limite physique imposée au LiDAR par la vitesse de la lumière.

3.2 Présentation de la progression du scan

Le calcul en temps réel des indicateurs de qualité utilisés pour l'affichage (positions GPS, limites de l'emprise et distance laser, toutes à 1 Hz) requiert très peu de ressources. Dans le processus entier, le délai principal est introduit par le report des données sur la carte numérique (points en couleur pour les positions GPS, lignes brisées pour l'emprise, etc.). Malgré l'usage d'un algorithme optimisé pour l'affichage, où seule la partie de la carte affectée par les changements est redessinée, le rafraîchissement graphique peut générer des délais importants. Ils peuvent atteindre 1 s, spécialement lorsque les fonctions pan ou zoom sont utilisées en parallèle, car elles nécessitent la mise à jour de tout l'écran. Néanmoins, ces délais dépendent surtout du matériel et pourraient être réduits avec un ordinateur équipé d'une carte graphique plus puissante.

4. Traitement off-line

Durant les vols de transition ou entre les lignes de vol, les algorithmes pour évaluer la complétude des données (QC de base) et leur exactitude (QC avancé) sont activés. Dans la configuration actuelle, ces algorithmes sont exécutés de manière séquentielle dans une chaîne séparée appelée LIAN (Lidar ANALyze module). L'exécution de cette chaîne peut être poursuivie parallèlement au calcul on-line, mais sa priorité est réduite et le calcul est ralenti. Dans les comparaisons nous considérons le «cas normal» où la chaîne est exécutée en mode standard entre les lignes de vol. Pour la gestion du vol, mieux

vaut fournir tous les indicateurs de qualité aussi rapidement que possible, au cas où une partie du périmètre devrait être complété.

4.1 Aucune optimisation (cas A)

La figure 4 représente le temps de calcul de LIAN pour une analyse complète de la qualité (réglage standard de LIAN) d'un nuage de 500 000 points avec différents scénarios d'optimisation. La barre horizontale inférieure indique le temps requis en l'absence d'optimisation algorithmique. La barre supérieure indique le temps de calcul avec le cumul des améliorations. Pour le scénario sans optimisation du code, la figure 4A illustre le temps très faible (env. 5 s) nécessaire pour les étapes du contrôle de qualité de base, telles que la lecture et le filtrage des données, le calcul de la grille de densité, la détermination de l'emprise, la détection des lacunes et l'établissement du MNS. La plupart du temps de calcul est requis pour les étapes plus complexes du contrôle de qualité, telles que la classification du sol (env. 65 s) et la propagation d'erreur (env. 35 s). Par la suite, on présente plusieurs stratégies visant à réduire le temps de calcul pour ces deux dernières étapes.

4.2 Calcul des normales agrégées (cas B)

Les analyses de la géométrie du scan et l'algorithme de classification du sol requièrent les normales locales pour chaque point. LIAN les calcule par l'analyse des composantes principales (PCA) de la matrice de covariance locale pour un certain voisinage N_p de taille k (Schaer et al. 2007). Un calcul rigoureux exige la ma-

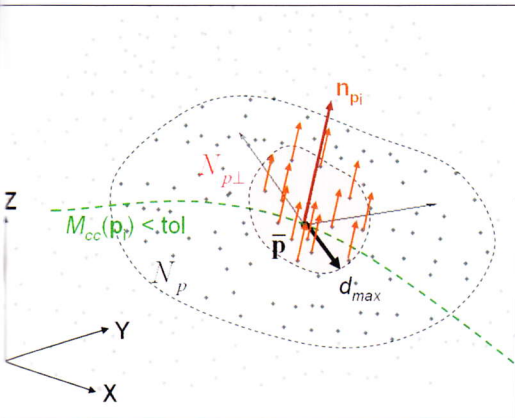


Fig. 5: Calcul de la normale locale par agrégation.

trice de covariance et la PCA pour chaque point laser. Cependant, lorsque la courbure est faible, la variation du vecteur normal est très petite pour des points voisins. La figure 5 illustre une méthode qui utilise cette propriété: si la courbure locale M_{cc} d'un point p_i est plus petite qu'un certain seuil $M_{cc_{max}}$, la normale calculée n_{pi} peut être assignée aux points qui se trouvent dans un rayon d_{max} du point original. Ainsi, pour tous les points dans un certain voisinage, un autre calcul de la covariance est superflu. Pour l'exemple de la figure 4B, la réduction du temps de calcul est modérée (3.2 s, soit env. 3%). Cependant pour une topographie douce, la réduction du temps de calcul peut atteindre 20% du temps de traitement total.

4.3 Partition des données (case C)

Pour la plupart des algorithmes utilisés pour la classification du sol et la propagation d'erreur, la relation entre la taille n

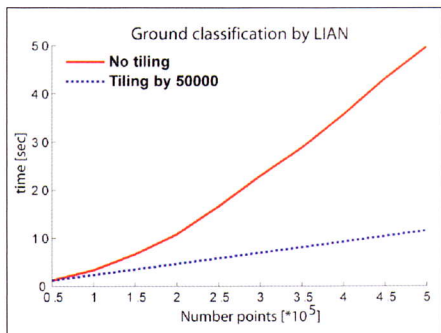


Fig. 6: Temps de calcul pour la classification du sol sans et avec partition.

de l'échantillon et le temps de calcul est non linéaire (ligne rouge de la figure 6). L'indexation spatiale nécessaire avant toute requête de données, en l'occurrence la construction d'un arbre kd, présente une croissance logarithmique du temps de calcul ($O(n \log n)$). Afin de limiter le temps nécessaire pour l'indexation spatiale et la requête de données, LIAN implémente une partition des données où le nuage de points est subdivisé en blocs réguliers (typiquement 50 000 points) de façon chronologique (figure 7). Pour éviter des résultats incohérents aux limites des tuiles, ces dernières sont définies avec un certain recouvrement (typiquement 5000 points). Par la suite, l'algorithme de classification du sol est appliqué par tuile et le nuage de points n'est assemblé qu'à la fin du processus. Ce procédé permet de maintenir une relation linéaire entre la taille de l'échantillon et le temps de calcul (ligne pointillée de la figure 6). L'augmentation possible de l'efficacité peut aussi être vue à la figure 4C, où le temps de calcul est réduit de plus de 40% lorsque la partition est implémentée.

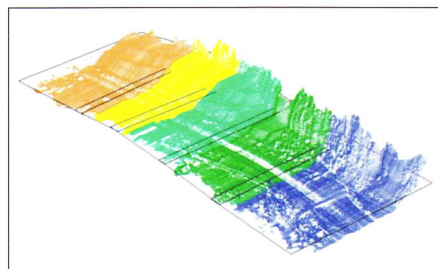


Fig. 7: Exemple de partition chronologique du nuage de points.

4.4 Factorisation du calcul de la covariance (cas D)

Comme décrit dans (Schaer et al. 2007), LIAN applique la loi de propagation de la covariance pour calculer la matrice de covariance 3×3 de chaque point laser. Ceci requiert la multiplication de matrices de complexité $O(2n^2p)$, où $n=3$ et $p=14$. Comme expliqué dans la même publication, la construction de l'indicateur de qualité q_i est basée sur les éléments diagonaux de la matrice de covariance. Ainsi, les termes non diagonaux sont inutiles et leur calcul peut être omis. Cette stra-

tégie est réalisée en faisant une factorisation complète et une agrégation des termes répétitifs de la multiplication des matrices. Exprimer les éléments intéressants de la matrice directement (en tant que simples multiplications) réduit de plus de 90% la charge de calcul nécessaire pour estimer la matrice de covariance. Pour la chaîne de traitement entière, ceci permet une réduction du temps de calcul de presque 30% (voir figure 4D).

4.5 Dilution sélective des données (cas E)

LIAN calcule les indicateurs de qualité individuels q_i combinant l'influence de la navigation

$$(\sigma_{xy}^{nav}, \sigma_z^{nav})$$

et de la géométrie du scan

$$(\sigma_{xy}^{geo}, \sigma_z^{geo})$$

pour chaque point laser (Schaer et al. 2007). A partir de cette information, une carte de qualité est générée selon une taille de cellule donnée (typiquement 1–2 m). Appliquer la propagation d'erreur complète à des données plus denses n'est pas optimal, puisque seule une partie de l'information est représentée. De plus, la densité du nuage de points est souvent hétérogène, comme le montre la figure 8A où les lignes de scan sont plus ou moins écartées en raison des variations de l'attitude et de la vitesse de la plateforme. L'algorithme de dilution sélective implémenté dans LIAN surmonte ce problème en enlevant les points qui se trouvent dans une certaine sphère autour du point requis (figure 8B). Ceci présente plusieurs avantages: D'abord, la quantité de don-

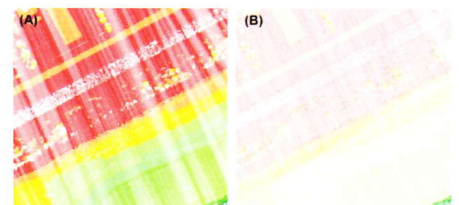


Fig. 8: Homogénéisation de la densité du nuage de points par dilution sélective: (A) données originales, (B) données diluées (colorées selon l'altitude).

Datasets	Grid difference No optimization – Cumulated optimizations (B–F)			
	$\overline{\Delta Z}$ [m]	σZ [m]	RMS_Z [m]	$ \Delta Z_{max} $ [m]
Density grid	–0.003	0.16	0.16	1.04
DTM grid	–0.11	0.35	0.37	15.7
Quality grid	0.002	0.09	0.09	9.1

Tab. 1: Comparaison des résultats de LIAN obtenus sans et avec optimisations, y compris un facteur d'omission de 3.

nées qui alimentent le calcul de propagation est fortement réduite. Ensuite, les données sont homogénéisées et échantillonnées conformément à la taille désirée des cellules de la carte de qualité. Pour l'exemple illustré dans la figure 4E, la dilution sélective réduit le temps de calcul de plus de 5 s, ce qui représente une amélioration d'environ 13%.

4.6 Omission de données (cas F)

Pour effectuer le contrôle de qualité pendant le vol, le traitement des données à la cadence maximale n'est pas nécessaire. On peut ignorer certaines données déjà lors du géoréférencement des points laser. Cependant, l'évaluation de la performance présentée dans la Section 3 a prouvé que l'algorithme qui génère le nuage de points fonctionne sans problème à un rythme de 100 kHz. Ainsi, mieux vaut n'ignorer certains points que lors de leur lecture dans LIAN. Ceci a l'avantage substantiel que le nuage de points calculé en vol est complet; il peut donc être utilisé directement en post-traitement avec la méthode RTK-ALS (Skaloud et al. 2010). La figure 4F indique la réduction du temps de calcul pour un facteur d'omission de 3, lorsque seul un point laser sur trois est introduit dans LIAN à partir des données à 10 kHz de Scan2map. En comparaison avec le scénario E, l'économie est de 21.5 s, soit une augmentation de vitesse de 57%. Cependant, la réduction du temps de calcul par cette approche est accompagnée d'une baisse de la résolution spatiale et probablement aussi d'une réduction de la fiabilité du contrôle. Donc,

il faut choisir le facteur d'omission de façon judicieuse, afin d'accroître l'efficacité du calcul sans perdre la pertinence de l'estimation de précision. Si l'altitude de vol, la vitesse de la plateforme et la cadence du laser sont connues a priori, la densité des points peut être prédite. En combinant cette information avec les paramètres du programme de cartographie et d'évaluation (c.-à-d. taille d'une cellule de la grille de densité, MNS, MNT et carte de qualité) la valeur du facteur d'omission peut être déterminée avant chaque mission. Dans le cas particulier de Scan2map, le facteur d'omission typique varie entre 2 et 4.

Le Tableau 1 vérifie la conformité de trois grilles de résultats de LIAN (grilles de densité, du MNT et de qualité) calculées d'abord avec la configuration de la figure 4A (aucune optimisation) puis avec la configuration de la figure 4F (optimisations cumulées). Bien que le temps de calcul soit réduit entre les deux scénarios d'un facteur de 6.5 (de 105.2 s à 16.1 s), les différences pour les grilles de densité et de qualité sont minimales et sans incidence sur le contrôle de qualité en vol. L'omission initiale de données ne modifie pas la validité de l'emprise et des lacunes, puisque leur calcul est basé sur la grille de densité.

En revanche, l'omission de données peut affecter la grille du MNT. Comme le nombre initial de points est fortement réduit, la classification du sol dans les zones en pente devient problématique. En conséquence, l'exactitude du MNT souffre principalement dans ces zones.

5. Conclusions et perspectives

La vitesse d'exécution des étapes de calcul liées à la génération et au traitement en temps réel du nuage de points laser ont été analysées. Plusieurs stratégies ont été suggérées pour améliorer l'efficacité dans les embouteillages de la chaîne de traitement. Ceci inclut des méthodes telles que le calcul de normales agrégées, la partition des données, la factorisation de la covariance et la dilution de données. La réussite de leur implémentation dans un module de logiciel (LIAN) est confirmée sur une base expérimentale considérable. Les évaluations de la performance ont montré que le GRD peut être effectué en temps réel pour un LiDAR avec une cadence allant jusqu'à 150 kHz. En omettant certaines données, on peut faire varier la performance du logiciel. Les opérations du contrôle de qualité de base, comme la détection de l'emprise et des lacunes, sont très rapides (moins de 5 s pour 0.5 million de points) et sont donc applicables à des cadences de données élevées. Les fonctions avancées du contrôle, telles que la classification du sol et la propagation d'erreur, requièrent davantage de temps de calcul (environ 25 s pour 0.5 million de points). Leur application peut être limitée pour des systèmes pulsés à plus de 50 kHz, bien qu'un tel rythme de calcul puisse encore générer une information pertinente pour gérer l'opération de lever, si l'on admet une certaine agrégation/résolution dans le temps et dans l'espace.

Pour appliquer les concepts de contrôle de qualité en vol au-delà d'une cadence de 50 kHz, la rapidité de calcul demeure le facteur limitant. En particulier, les requêtes de données dans le nuage de points et la dérivation de l'information sur la variance (classification des données, propagation d'erreur) demandent une puissance de calcul élevée. Un ordinateur plus puissant (p.ex. un rack industriel) pourrait accélérer le traitement en temps réel, mais ce sont surtout les fantastiques capacités de traitement en parallèle des processeurs graphiques (Graphics Proces-

sing Units = GPU) qui laissent entrevoir une solution. Par exemple (Garcia et al. 2008) démontrent que le traitement en parallèle avec une carte graphique standard accélère la recherche de points voisins dans le nuage (via un arbre kd, une des opérations les plus fréquentes dans LIAN) par un facteur allant jusqu'à 120. Adapter le logiciel pour le traitement en parallèle ouvrirait un champ d'investigation pour l'analyse de systèmes laser pulsés à une cadence bien plus grande.

Remerciements

Ces investigations ont été financées essentiellement par la Commission pour la Technologie et l'Innovation (CTI/KTI Projet 7782 EPRP) en collaboration avec BSF Swissphoto.

Bibliographie:

El-Sheimy, N., Valeo, C. and Habib, A., 2005. Digital terrain modeling. Artech House.

Garcia, V., Debreuve, E. and Barlaud, M., 2008. Fast k nearest neighbor search using GPU, CVPR Workshop on Computer Vision on GPU, Anchorage, Alaska, USA.

Schaer, P., Skaloud, J., Landtwig, S. and Legat, K., 2007. Accuracy Estimation for Laser Point Cloud Including Scanning Geometry. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(5): 8.

Schaer, P., Skaloud, J. and Tome, P., 2008. Towards in-flight quality assessment of airborne laser scanning. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37(B5): 851–856.

Skaloud, J., Schaer, P., Stebler, Y. and Tome, P., 2010. Real-time registration of airborne laser data with sub-decimeter accuracy. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65: 208–217.

J. Skaloud
P. Schaer
B. Merminod
EPFL
Laboratoire de Topométrie
Station 18
CH-1015 Lausanne
jan.skaloud@epfl.ch



Online Shop
www.allnav.com

allnav ag
Ch. de la Charrière 3
CH-1891 Vérossaz
www.allnav.com

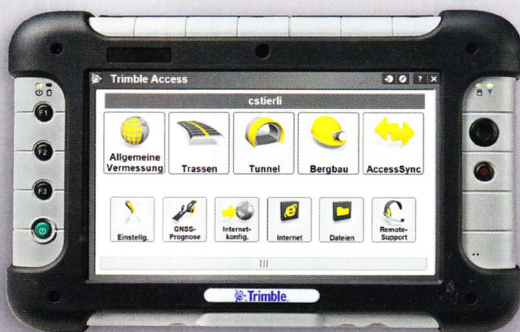
Tel. 024 550 22 15
Fax 024 550 22 16
romandie@allnav.com

Hauptsitz Schweiz: CH-5504 Othmarsingen
Geschäftsstelle Deutschland: D-71522 Backnang



NOUVEAU! Trimble Tablet

Avec des fonctionnalités DAO et caméra intégrée



Esquisses



DAO



Volumes

